第38卷 第4期
2021年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

基于CSLE模型的天山北坡中段山区水力侵蚀时空变化特征及影响因素研究

常梦迪[1,2]， 王新军[1,2]， 李 娜[1,2]， 闫立男[1,2]， 马 克[1,2]， 李菊艳[3]

（1. 新疆农业大学草业与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052；3. 新疆维吾尔自治区水土保持生态环境监测总站，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘 要： 掌握天山北坡土壤水蚀分异的空间规律及其驱动力，对生态预警和土壤侵蚀防治具有重要意义，为天山北坡区域生态环境的综合治理提供理论依据和数据支持。以天山北坡中段山区为例，基于中国土壤流失方程（Chinese Soil Loss Equation，CSLE），采用野外调研、地理信息系统、数理统计和地理探测器等方法，定量分析2000—2018年研究区土壤水力侵蚀的时空格局特征（面积，强度和地理分布），借助地理探测器探究降雨、地形、土壤、植被对土壤水力侵蚀强度的内在驱动力。结果表明：（1）2000—2018年天山北坡中段山区土壤水力侵蚀强度主要以微度、轻度侵蚀为主，分别占总面积的32.34%~40.87%、33.36%~43.01%。近20 a的微度、轻度侵蚀的面积均呈下降趋势（−26.70 $km^2 \cdot a^{-1}$、−77.47 $km^2 \cdot a^{-1}$），而其他侵蚀强度的面积均呈上升趋势（22.10~30.96 $km^2 \cdot a^{-1}$），总体上土壤水力侵蚀强度处于增加趋势。（2）整体土壤侵蚀模数呈乌鲁木齐市 > 昌吉市 > 阜康市 > 呼图壁县 > 玛纳斯县 > 沙湾县 > 石河子市。天山北坡中段山区侵蚀强度的空间分布与降雨、地形、土壤、植被密切相关，土壤类型为棕钙土、草毡土、栗钙土，植被覆盖度小于15%、坡度大于15°和降雨量在400~450 mm范围内的地区为高风险侵蚀区域。（3）分异性的大小由因子探测器中q值来度量，其q值越大，该影响因素对土壤侵蚀空间分布的解释力越强，呈降雨（0.49）> 土壤类型（0.17）> 坡度（0.11）> 植被覆盖度（0.10）。不同影响因素通过交互作用明显增强土壤侵蚀空间异质性，及植被覆盖度与降雨因子的耦合作用，q值增幅极大，确定土壤侵蚀重点治理区域对全面土壤侵蚀防治具有重要意义。

关键词： 天山北坡；水力侵蚀；CSLE模型；时空格局；地理探测器；影响因素

土壤侵蚀是指在自然和人为因素的作用下，土壤及其母质的侵蚀、破坏、运输和沉积的过程。研究土壤侵蚀对提高土地生产力，改善环境、降低风沙、泥石流等自然灾害具有积极影响[1]。面对日益严重的土壤侵蚀等生态环境问题，迫切需要开展土壤侵蚀监测工作并探究驱动影响因子，对新疆天山北坡土壤侵蚀综合治理提供数据支持，同时为该区域的水土保持和经济的可持续发展提供科学参考。

对于土壤侵蚀的定量研究，土壤侵蚀模型方法是最广泛、最有效的方法。通用土壤流失方程（Universal Soil Loss Equation，USLE）[2]和修正通用土壤流失方程（Revised Universal Soil Loss Equation，RUSLE）[3]是国外经验模型的典型代表。刘宝元以USLE和RUSLE模型为基础，经改进提出了适用于全国坡面侵蚀的CSLE模型[4]。CSLE模型是目前发展较为成熟的土壤侵蚀模型，其充分考虑到我国陡坡土壤侵蚀的特点和水土保持措施，其结构简单、参数易于获取。CSLE模型已被广泛应用于干旱区、半干旱区[5-6]探究土壤侵蚀时空动态变化及影响因素。尽管以上研究侧重于地理环境因素和人类活动对土壤侵蚀的影响，但其并无法量化影响因素对土壤侵蚀的影响程度，而地理探测器不仅可以分析单个自变量对因变量的解释力，还可以确定自变量之间的交互作用对因变量的影响[7]。近年来，地理探测器应用广泛，其研究区域大到国家尺度，小到乡镇尺度；其研究领域在社会科学、人类健康、自然科学和环境科学等方面得到应用。部分学者采用地理探测器对土壤侵蚀定量归因进行研究[8]，可见

收稿日期： 2020-11-16； **修订日期：** 2021-01-25
基金项目： 新疆维吾尔自治区财政专项“天山北坡典型区水土流失与经济发展关系研究”（213031002）
作者简介： 常梦迪（1996-），女，硕士研究生，主要从事水土流失监测与评估、地理信息系统及遥感应用研究. E-mail: 1761316194@qq.com
通讯作者： 王新军. E-mail: wxj8112@163.com

将CSLE模型应用于土壤侵蚀定量评价并通过地理探测器探究土壤侵蚀的空间分异及其内在驱动力，是区域土壤侵蚀研究的基本趋势。

新疆大部分土壤侵蚀的研究主要集中在降水量相对较高的伊犁河谷区域[9-10]，而关于天山南北坡的研究较少，且相关研究主要集中在小流域单一年份土壤侵蚀情况[5]，缺乏关于土壤侵蚀的时空动态变化以及定量归因研究。天山山区降雨存在明显的空间异质性，北坡（迎风坡）大于南坡（背风坡）。天山北坡是国家级水土流失重点预防区，根据第一次全国水利普查水土保持情况公报数据[11]，天山北坡水蚀强度较大的区域主要集中在天山北坡中段，主要包含阜康市、乌鲁木齐市、昌吉市、呼图壁县、玛纳斯县、石河子市、沙湾县7个行政区的山地丘陵区。因此本文以天山北坡中段山区为例，基于CSLE模型定量分析2000—2018年研究区的土壤水力侵蚀时空变化特征，充分掌握土壤侵蚀状况，并应用地理探测器方法定量探究引起土壤侵蚀的多种因素，为后续水土保持建设提供科学支撑和理论依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山北坡中段，包含阜康—沙湾共7个行政区所在的山地区域（图1）。地理位置为84°50′~88°58′E，42°55′~44°22′N，东西宽334 km，南北长161 km，总面积约2.80×10^4 km^2。地势南高北低，海拔约为472~5251 m。天山北坡迎风背阳，降雨量多，太阳辐射少，较为湿润，多年平均降雨量为452.03 mm，降雨集中在5—8月，占年降雨量的66.59%。年平均气温为7.2 ℃，夏季平均气温为23.9 ℃，冬季平均气温为-12.5 ℃。土壤类型主要为棕钙土、栗钙土、黑钙土、灰褐土、黑毡土、草毡土。植被类型多样且时空分布差异大，主要由草本（72.13%）、乔木（7.10%）和灌木（0.68%）构成。植被覆盖度在山区较高，平原区较低，在阴坡较高，阳坡较低。

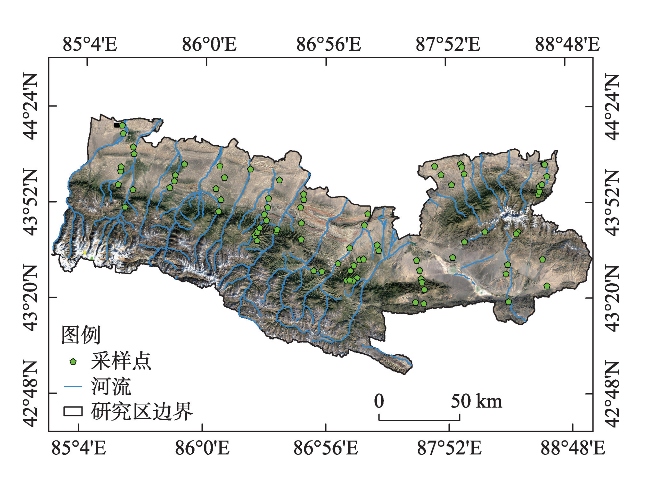


图1 研究区示意图

Fig. 1 Diagram of the study area

1.2 数据来源与处理

依据新疆季节气候及植被生长情况，选择除去冬季外的3—11月为研究时间段。选取2000—2018年4—10月的Landsat系列遥感影像数据，时间分辨率为16 d，空间分辨率为30 m，数据来源于美国地质调查局USGS（https://www.usgs.gov/）；从Earth Data（https://earthdata.nasa.gov/）获取2000—2018年MODIS数据产品MOD13Q1，时间分辨率为16 d，空间分辨率为250 m。从中国气象数据网（http://data.cma.cn/）获取2000—2018年乌鲁木齐牧试站、乌鲁木齐站及周边区域共18个气象站点的日降水数据。从地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）获取研究区SRTM空间分辨率为30 m的DEM数据。根据中国《土地利用现状分类》（GB/T 21010-2017）[12]，采用二级分类体系，结合研究区实际情况，共划分12类（天然牧草地、人工牧草地、其他草地、乔木林地、灌木林地、其他林地、旱地、水浇地、采矿用地、风景名胜设施用地、内陆滩涂、农村宅基地），使用Landsat系列遥感影像、高分影像通过人机交互解译获取研究区2000年、2005年、2010年、2015年、2018年土地利用数据。本研究依据区域土地利用类型的空间分布特征，分别在各期土地利用分类图上采用分层随机抽样方法抽取200个样点，经野外调查和Google Earth历史高空间分辨率影像检验，总体分类精度均高于85%，满足研究所需要求。从中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/）获取研究区土壤类型数据。

MODIS MOD13Q1数据使用MRT软件进行格式转换（HDF转换成Tiff），并执行归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）数据的导出、投影转换、裁剪、最大值合成法等处理。Landsat数据使用ENVI 5.3软件进行预处理，辐射定标后采用FLAASH（Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes）模型[13]进行大气校正。同时，以校正好的2015年研究区Landsat TM遥感影像为标准底图，采用二次多项式拟合法对影像

进行几何精纠正,然后提取NDVI数据并进行镶嵌和裁剪等处理。

野外调查采用分层随机采样方法,考虑土壤类型和草地类型的基础上,再结合流域完整性及地形坡位、土地利用类型、禁牧与放牧,再根据样点的均匀性和可达性设计采样点。于2019年7月对82个采样点开展野外采样工作。样地大小设置为30 m×30 m,并在对角线的两端及中心位置设置3个1 m×1 m的样方。核查实际土地利用类型及采集0~20 cm层的土壤样品,采用重铬酸钾容量法测定土壤的有机质含量,使用激光粒度分析仪Microtrac Bluewave S350测定土壤颗粒大小。采用野外垂直向上照相法获取林地郁闭度及采用野外垂直向下照相法获取草地、灌木林地的覆盖度。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤水力侵蚀模型　采用中国土壤流失方程(CSLE)[4]进行模型的构建,计算公式如下:

$$A = R \times K \times L \times S \times B \times E \times T \qquad (1)$$

式中:R为降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$);$K$为土壤可蚀性因子[$t \cdot hm^2 \cdot h \cdot (hm^{-2} \cdot MJ \cdot mm^{-1})$];$L$、$S$分别为坡长因子、坡度因子;$B$、$E$、$T$分别为生物措施因子、工程措施因子、耕作措施因子;$A$为单位面积的年平均土壤流失量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)。将$R$、$K$、$L$、$S$、$B$、$E$、$T$因子的栅格数据进行空间相乘,当土地利用类型为耕地时,在生物措施因子、耕作措施因子两者中,选取耕作措施因子与其他5个因子栅格数据相乘;当土地利用类型为非耕地时,则选取生物措施因子与其他5个因子栅格数据相乘,得到天山北坡中段山区土壤侵蚀模数数据。根据国家水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)[14]将土壤侵蚀模数分为0~200 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$、200~2500 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$、2500~5000 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$、5000~8000 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$、8000~15000 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$、> 15000 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$共6个等级。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)

通过对各种算法的比较及数据获取情况,采用章文波等[15]根据日降雨量数据计算半月降雨侵蚀力的算法模型。为了与生物措施因子的时间步长保持一致,将半月降雨侵蚀力模型改进为16 d降雨侵蚀力模型。计算2000—2018年18个气象站点3—11月(以16 d为间隔)的降雨侵蚀力,并将一年中3—11月的降雨侵蚀力累加得到年降雨侵蚀力。采用反距离权重插值(Inverse Distance Weight, IDW)方法[16]计算得到2000—2018年研究区降雨侵蚀力因子。

(2) 土壤可蚀性因子(K)

相较于直接测定法和公式法计算土壤可蚀性因子K值,USLE模型中Wischmeier等[17]提出的诺谟图模型(Nomogragh Model, Nomo)计算K值,虽比较繁琐,但精确度较高,所得的K值较稳定。RUSLE模型中对Nomo模型修正得到修正诺谟图模型(Modified Nomogragh Model, Mnomo)。采用Mnomo模型计算各土壤样品的K值,得到各土壤类型的平均K值,并赋值于土壤类型空间分布图,得到研究区土壤可蚀性因子。

(3) 坡长、坡度因子(L、S)

采用Foster等[18]根据分段坡的公式计算坡长因子[19];坡度 < 10°选用McCool等[20]的公式,坡度≥10°选用Liu等[21]的公式计算坡度因子。

(4) 生物措施因子(B)

① ESTARFM时空融合模型

Landsat数据易受云雨天气的影响,且无法获取连续的高质量时序数据;MODIS数据具有较好的时效性,但空间分辨率较低。因此采用Zhu等[22]提出的增强型自适应反射率时空融合模型(Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model, ESTARFM)用于将Landsat NDVI空间数据(分辨率30 m,16 d)和MODIS NDVI时间数据(分辨率250 m,16 d)进行时空融合,时空融合后得到的数据与Landast NDVI数据空间分辨率一致,与MODIS NDVI数据时间序列一致,统一使用年积日表示数据的获取日期,即第65~337 d,得到每年各18景空间分辨率为30 m、时间分辨率为16 d的NDVI数据。

② 植被覆盖度估算模型

植被覆盖度的计算采用像元二分模型[23],计算植被覆盖度的关键在于$NDVI_{veg}$(纯植被端元的NDVI值)和$NDVI_{soil}$(纯土壤端元的NDVI值)的确定,以往的研究中将$NDVI_{veg}$对应于影像$NDVI_{max}$、$NDVI_{soil}$对应于影像$NDVI_{min}$。由于影像中噪声的影响,使得NDVI值过高或过低。为避免这种误差,在确定$NDVI_{veg}$和$NDVI_{soil}$时,根据研究区主要植被覆盖类型的NDVI值与对应实测样点的植被覆盖度变化曲线,把其关系代入像元二分模型中,得到二元一次方程组,进而计算得到不同植被覆盖类型的$NDVI_{veg}$和$NDVI_{soil}$[24]。采用时空融合得到的NDVI数据,以各时期土地利用数据为掩膜,将计算得到

不同植被覆盖类型的 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 代入像元二分模型中，实现对植被覆盖度的估算，得到每年各18景的植被覆盖度数据(以16 d为间隔)。

③ 生物措施因子 *B* 值计算

采用蔡崇法等[25]根据生物措施因子与植被覆盖度的关系式，估算以16 d为间隔的生物措施因子。在原始RUSLE模型的基础上，以16 d为间隔的生物措施因子并结合各时段降雨侵蚀力因子比例，计算得到年内加权平均生物措施因子[26]。

(5) 工程措施因子(*E*)

依据遥感解译和野外调查结果，研究区内未发现《区域水土流失动态监测技术规定(试行)》[27]中水土保持工程措施因子赋值表所列的工程措施类型。因此，研究区工程措施因子统一赋值为1。

(6) 耕作措施因子(*T*)

根据《区域水土流失动态监测技术规定(试行)》[27]中的耕作措施轮作措施赋值表进行赋值，天山北坡中段山区属于西北干旱灌溉一熟兼二熟区，北疆灌溉一熟填闲区，按照各地块进行赋值，耕地赋值为0.281，其他赋值为1。

1.3.2 地理探测器 地理探测器是一种统计学方法，包括因子探测器、交互作用探测器、生态探测器和风险探测器4个部分，通过探测要素的空间分层异质性来揭示某原因背后的驱动力[7]。因子探测器可用于分析某种驱动力是否引起土壤侵蚀空间格局特征的主要原因，分异性的大小由 *q* 值来度量，可识别出影响土壤侵蚀的主导因素。交互作用探测器可用于识别影响因子之间的交互作用对土壤侵蚀空间分布的解释力。生态探测器可用于比较两个影响因子对土壤侵蚀空间分布的影响是否存在显著差异。风险探测器可用于判断单个影响因子的各层之间土壤侵蚀量是否存在显著差异，并确定土壤侵蚀高风险区[8]。*q* 值计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{m} n_h \sigma_h^2}{n\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \qquad (2)$$

式中：h=1，…，m 为变量或因子的分层，即分类或分区；n_h 和 n 分别为层 h 和全区的单元数；σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区变量的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差。q 值区间为[0，1]，其 q 值越大，该影响因素对土壤侵蚀空间分布的解释力越强。

土壤侵蚀受降雨、地形、土壤、植被等多种因素的影响，本文选择多年平均降雨量，多年平均植被覆盖度、坡度、土壤类型作为土壤侵蚀影响因子，多年平均土壤侵蚀模数作为因变量，模型运行之前对连续型变量进行分类处理[7]。

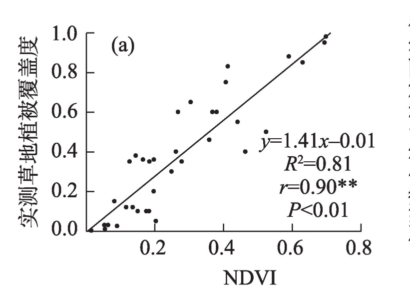
2 结果与分析

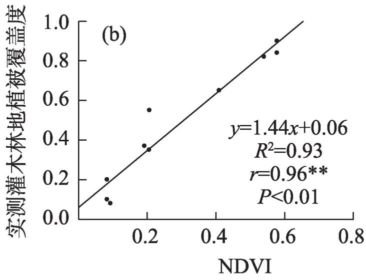
2.1 植被覆盖度估算模型构建及精度分析

利用草地(35个)、灌木林地(10个)实测采样点的植被覆盖度及乔木林地(15个)实测采样点的郁闭度与NDVI构建线性回归方程(图2)。草地和灌木林地的NDVI与植被覆盖度均呈极显著正相关(r=0.90，r=0.96；$P<0.01$)。乔木林地的NDVI与植被郁闭度呈极显著正相关(r=0.70，$P<0.01$)。通过建立植被覆盖度实测值与估测值之间的线性关系得到散点图(图3)，决定系数 R^2 为0.93，均方根误差RMSE为0.09。两者的相关性散点分布相对集中，主要集中在1∶1对角线(y=x)附近，拟合趋势线接近于1∶1对角线，斜率 K 为1.04，总体预测精度较高。

2.2 土壤水力侵蚀时间格局特征分析

从表1可以看出，2000—2018年天山北坡中段山区土壤水力侵蚀主要以微度、轻度侵蚀为主，分别占总面积的32.34%~40.87%、33.36%~43.01%；中





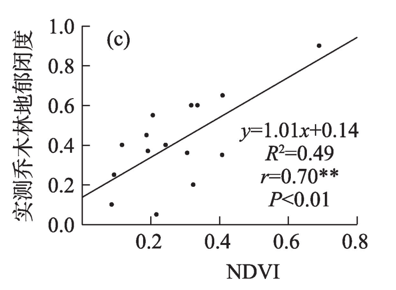


图2 NDVI与草地、灌木林地植被覆盖度及乔木林地郁闭度的线性关系

Fig. 2 Linear relationship between NDVI and vegetation coverage of grassland, shrub land and canopy density of arbor forest land

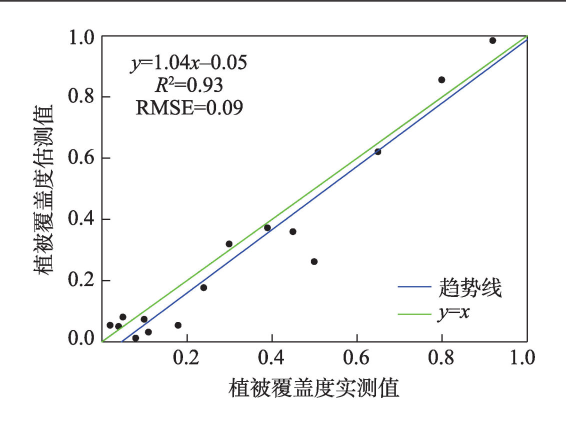


图3　植被覆盖度实测值与估测值的线性关系

Fig. 3　Linear relationship between measured and estimated vegetation coverage

表1　2000—2018年天山北坡中段山区不同土壤水力侵蚀强度面积比例及变化率

Tab. 1　Proportion and change rate of different soil hydraulic erosion intensity area in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

侵蚀级别	面积百分比/%				面积变化率/($km^2\cdot a^{-1}$)
	最大值	最小值	平均值	标准偏差	
微度	40.87	32.34	36.99	2.69	−26.70
轻度	43.01	33.36	38.37	3.11	−77.47
中度	13.84	7.37	10.40	1.39	22.27
强烈	7.66	3.08	5.32	1.17	22.10
极强烈	7.29	2.97	4.63	1.38	28.84
剧烈	7.52	1.57	4.30	1.95	30.96

度次之，占总面积的7.37%~13.84%；其他侵蚀强度占比相对较少，合计占总面积的7.62%~22.47%。2000—2018年研究区各侵蚀强度增速最大的为剧烈侵蚀，每年以30.96 km^2的速度增加；中度、强烈、极强烈侵蚀次之，每年分别以22.27 km^2、22.10 km^2、28.84 km^2的速度增加；而微度、轻度侵蚀呈下降趋势，每年分别以26.70 km^2、77.47 km^2的速度减少。总体上，土壤水力侵蚀强度处于增加。从图4可知，2000—2018年天山北坡中段山区年均土壤侵蚀模数总体呈上升趋势，每10 a增加了576.93 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$。其中2008年的土壤侵蚀模数最低，为1673.49 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$；2016年的土壤侵蚀模数最高，达到4496.08 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$。2000—2018年多年平均土壤侵蚀模数为(2817.63±940.76)$t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$。

2.3　土壤水力侵蚀空间格局特征分析

从表2可以看出，2000—2015年天山北坡中段山区土壤侵蚀面积呈增加趋势，与2000年相比土壤侵蚀比重增加了8.2%。主要是因为中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积均呈逐渐增加趋势，土壤侵蚀比重分别从2000年的7.37%、3.08%、2.97%、3.02%增加至2015年的13.84%、7.66%、6.41%、6.39%，微

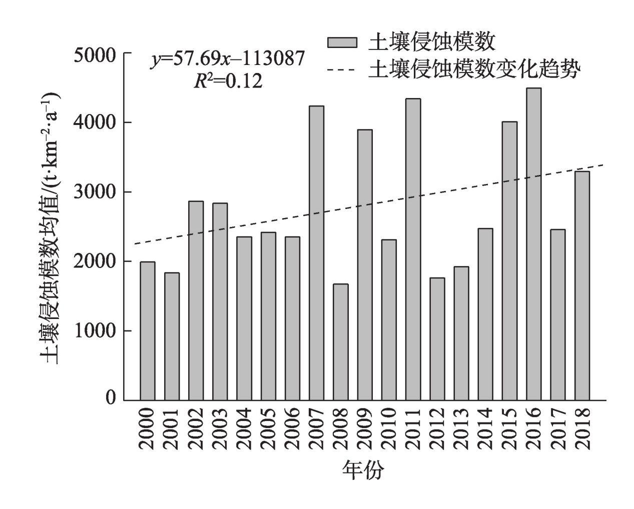


图4　2000—2018年天山北坡中段山区年平均土壤侵蚀模数变化

Fig. 4　Changes of annual average soil erosion modulus in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

表2　2000—2018年天山北坡中段山区不同土壤水力侵蚀强度面积及比例

Tab. 2　Area and proportion of different soil hydraulic erosion intensity in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

年份	土壤侵蚀													
	微度		轻度		中度		强烈		极强烈		剧烈		合计	
	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%
2000	11362.58	40.54	12054.92	43.01	2066.71	7.37	864.03	3.08	831.61	2.97	846.98	3.02	16664.26	59.46
2005	9986.28	35.63	11590.47	41.35	2882.38	10.28	1393.46	4.97	1184.96	4.23	989.29	3.53	18040.55	64.37
2010	9747.85	34.78	11443.27	40.83	3278.11	11.70	1683.56	6.01	1085.06	3.87	789.00	2.82	18278.99	65.22
2015	9063.53	32.34	9350.84	33.36	3879.32	13.84	2145.91	7.66	1795.91	6.41	1791.33	6.39	18963.31	67.66
2018	10550.34	37.64	10130.22	36.14	2736.21	9.76	1485.57	5.30	1527.08	5.45	1597.43	5.70	17476.49	62.36

度、轻度侵蚀面积比重共减少了17.85%。而2015—2018年土壤侵蚀面积减小，土壤侵蚀状况略有好转，土壤侵蚀比重减少了5.30%。主要由于中度及以上侵蚀面积减少，土壤侵蚀比重从2015年的34.30%减少至2018年的26.21%，微度、轻度侵蚀面积比重共增加了8.08%。由2000—2018年天山北坡中段山区各行政区的土壤侵蚀模数可知(表3)，近20 a年均土壤侵蚀模数呈乌鲁木齐市＞昌吉市＞阜康市＞呼图壁县＞玛纳斯县＞沙湾县＞石河子市。近年来，乌鲁木齐市旅游业的发展不仅带来了经济增长，也对旅游景区的生态环境造成了影响。旅游活动对土壤、植被的干扰，引起土壤可蚀性和生物措施因子的变化，易诱发土壤侵蚀。其次为昌吉市，畜牧业发展较为旺盛；阜康市次之，是矿产资源集中分布区。随着旅游业、畜牧业和采矿业的发展，植被覆盖等阻碍土壤侵蚀发生的因素减少作用，局部地区的土壤侵蚀有所增加。由2000—2018年天山北坡中段山区土壤水力侵蚀强度空间分布图可知(图5)，土壤水力侵蚀强度较大的区域主要集中在乌鲁木齐市达坂城区和南部高山区。

表3 2000—2018年天山北坡中段山区不同行政区的土壤侵蚀模数

Tab. 3 Soil erosion modulus of different administrative regions in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

行政区	面积/km^2	平均值/(t·km^{-2}·a^{-1})	标准偏差
乌鲁木齐市	10207.93	3595.54	1383.32
昌吉市	3258.90	3321.55	1182.19
阜康市	2096.09	3256.73	1170.54
呼图壁县	3143.32	2251.31	704.94
玛纳斯县	3107.89	2136.43	712.25
沙湾县	6126.55	1752.93	767.79
石河子市	68.86	1651.66	648.60

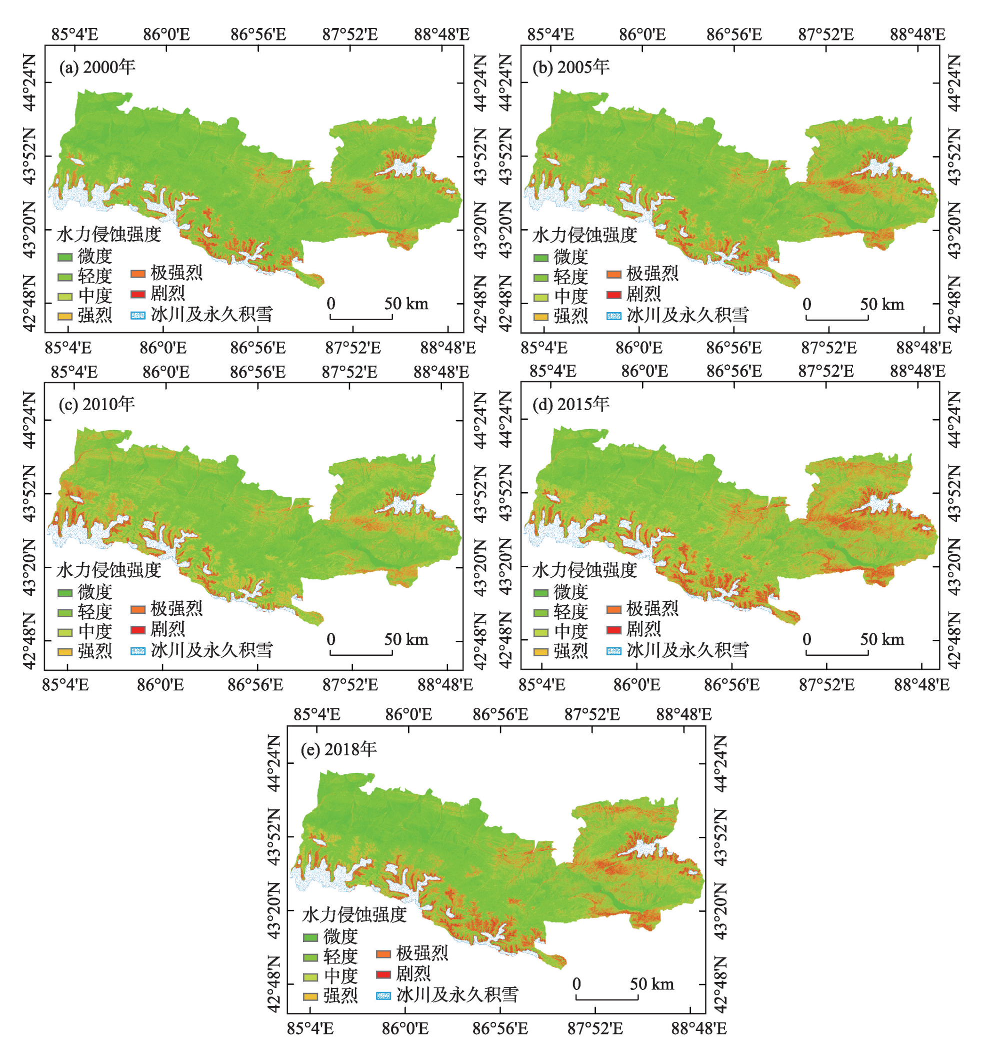


图5 2000—2018年天山北坡中段山区土壤水力侵蚀强度分级

Fig. 5 Classification of soil hydraulic erosion intensity in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

2.4 土壤水力侵蚀的影响因素分析

2.4.1 气候因素 天山北坡处于迎风坡,降雨量相对较大,影响土壤侵蚀的主要气候因素为降雨。由2000—2018年天山北坡中段山区不同降雨量等级土壤侵蚀模数可知(表4),当降雨量在400~450 mm时,土壤侵蚀模数最大且波动较大,为(5159.30 ± 2119.70)t·km^{-2}·a^{-1};其次为250~300 mm时,土壤侵蚀模数为(3845.19 ± 1378.17)t·km^{-2}·a^{-1};当降雨量在200~250 mm时,土壤侵蚀模数最小且波动较小,为(2193.76 ± 740.47)t·km^{-2}·a^{-1}。

表4 2000—2018年天山北坡中段山区不同降雨量的土壤侵蚀模数

Tab. 4 Soil erosion modulus of different rainfalls in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

降雨量/mm	面积/km^2	平均值/(t·km^{-2}·a^{-1})	标准偏差
< 200	1658.59	2416.40	882.16
200~250	13440.73	2193.76	740.47
250~300	5938.33	3845.19	1378.17
300~350	3537.69	2712.73	984.20
350~400	1481.54	2707.38	1037.19
400~450	1390.05	5159.30	2119.70
> 450	562.61	3247.77	1435.89

2.4.2 地形因素 坡度是地形地貌的关键因素之一,也是影响土壤侵蚀的重要因素。由2000—2018年天山北坡中段山区不同坡度等级土壤侵蚀模数可知(表5),当坡度 < 5°时,土壤侵蚀模数最小且波动较小,为(491.33 ± 169.21)t·km^{-2}·a^{-1};当坡度 > 35°时,土壤侵蚀模数最大且波动较大,为(5881.15 ± 2030.53)t·km^{-2}·a^{-1}。坡度对土壤侵蚀模数有正向影响,随着坡度的增大,土壤侵蚀模数增大。从不同坡度土壤侵蚀模数总数来看,坡度 > 15°的土壤侵蚀模数总数为62.12 × 10^6 t·a^{-1},占总土壤侵蚀比重的78.68%。可见土壤侵蚀主要发生在坡度大于15°的区域,主要是由于坡度较大,植被较稀疏,土壤可侵蚀性较高,造成土壤侵蚀强度较大。

表5 2000—2018年天山北坡中段山区不同坡度的土壤侵蚀模数

Tab. 5 Soil erosion modulus of different slopes in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

坡度/(°)	面积/km^2	平均值/(t·km^{-2}·a^{-1})	标准偏差	合计/(10^6 t·a^{-1})	模数比例/%
< 5	6211.81	491.33	169.21	3.05	3.87
5~15	8143.32	1691.67	561.92	13.78	17.45
15~25	5262.29	3211.45	1078.22	16.90	21.41
25~35	4512.37	4963.40	1703.94	22.40	28.37
> 35	3879.75	5881.15	2030.53	22.82	28.90

2.4.3 土壤因素 由2000—2018年天山北坡中段山区不同土壤类型的土壤侵蚀模数可知(表6),不同土壤类型抵抗土壤侵蚀的能力也各不相同,呈草毡土 > 灰棕漠土 > 棕钙土 > 栗钙土 > 冷钙土 > 黑毡土 > 灰漠土 > 黑钙土 > 灰褐土。从不同土壤类型土壤侵蚀模数总数来看,土壤类型为棕钙土、草毡土、栗钙土时,土壤侵蚀模数总数为42.02 × 10^6 t·a^{-1},占总土壤侵蚀比重的71.65%。可见土壤侵蚀主要发生在土壤类型为棕钙土、草毡土、栗钙土的区域,主要是由于棕钙土、栗钙土位于海拔1200 ~ 1600 m的北部山前冲积扇及倾斜平原区域,植被覆盖较差,土壤可侵蚀性较高,且土地面积较大;草毡土位于海拔3000 m以上,其土壤侵蚀模数最大。

表6 2000—2018年天山北坡中段山区不同土壤类型的土壤侵蚀模数

Tab. 6 Soil erosion modulus of different soil types in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

土壤类型	面积/km^2	平均值/(t·km^{-2}·a^{-1})	标准偏差	合计/(10^6 t·a^{-1})	模数比例/%
草毡土	3547.26	4118.67	1453.32	14.61	24.91
灰棕漠土	1286.54	2903.56	1247.67	3.74	6.37
棕钙土	6526.77	2399.07	841.61	15.66	26.70
栗钙土	6204.56	1893.80	657.52	11.75	20.04
冷钙土	1010.11	1840.50	776.76	1.86	3.17
黑毡土	3639.99	1635.77	632.97	5.95	10.15
灰漠土	1515.67	1246.43	417.07	1.89	3.22
黑钙土	1961.49	759.18	291.66	1.49	2.54
灰褐土	2317.17	733.31	270.80	1.70	2.90

2.4.4 植被因素 由2000—2018年天山北坡中段山区不同植被覆盖度等级土壤侵蚀模数可知(表7),随着植被覆盖度的升高,土壤侵蚀模数降低。当植被覆盖度 < 15%时,土壤侵蚀模数最大且波动较大,为(4362.28 ± 1680.50)t·km^{-2}·a^{-1},易诱发土壤侵蚀;当植被覆盖度 > 75%时,土壤侵蚀模数最小且波动较小,为(561.44 ± 290.90)t·km^{-2}·a^{-1},说明较高的植被覆盖度能够对土壤进行保护,防止发生土壤侵蚀。从不同植被覆盖度土壤侵蚀模数总数来看,

表7 2000—2018年天山北坡中段山区不同植被覆盖度的土壤侵蚀模数

Tab. 7 Soil erosion modulus of different vegetation coverage in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

植被覆盖度/%	面积/km²	平均值/(t·km⁻²·a⁻¹)	标准偏差	合计/(10⁶ t·a⁻¹)	模数比例/%
< 15	14147.50	4362.28	1680.50	61.72	77.65
15~30	3794.06	2071.44	710.12	7.86	9.89
30~45	2474.79	1596.20	567.95	3.95	4.97
45~60	3412.61	930.85	376.54	3.18	4.00
60~75	2744.78	716.53	300.64	1.97	2.47
> 75	1435.80	561.44	290.90	0.81	1.01

当植被覆盖度<15%时，土壤侵蚀模数总数为61.72×10^6 t·a^{-1}，占总土壤侵蚀比重的77.65%。可见土壤侵蚀主要发生在植被覆盖度<15%的区域，主要是由于植被覆盖度<15%的土地面积较大，为14147.50 km²，且土壤侵蚀模数较高。

2.5 土壤侵蚀影响因素定量分析

由2000—2018年天山北坡中段山区土壤侵蚀影响因素探测结果可知(表8)，不同影响因子对土壤侵蚀强度的解释力有明显差异，q值由大到小依次为：降雨(0.49)>土壤类型(0.17)>坡度(0.11)>植被覆盖度(0.10)。其中降雨对土壤侵蚀强度的解释力最强，是影响土壤侵蚀空间格局分布的主要因素；其次为土壤类型，其土壤理化性质与土壤侵蚀密切相关。交互作用探测器结果表明，不同影响因素通过交互作用对土壤侵蚀空间分布的影响远大于单个因素。其中坡度∩土壤类型(0.28)为非线性增强；其余因子两两之间交互为双因子增强。降雨与其他因子之间的交互作用明显大于剩余因子之间的交互作用。生态探测器结果表明，坡度和土壤类型对土壤侵蚀空间分布的影响存在显著差异($P<0.05$)。通过风险探测器并结合前文的影响因素分析识别出高风险区，结果表明土壤类型为棕钙土、草毡土、栗钙土，植被覆盖度小于15%、坡度大于15°和降雨量在400~450 mm之间的地区为高风险侵蚀区域。

表8 2000—2018年天山北坡中段山区土壤水力侵蚀影响因素探测结果

Tab. 8 Detection results of influencing factors of soil hydraulic erosion in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2018

	降雨	坡度	土壤类型	植被覆盖度
降雨	0.49	-	-	-
坡度	0.54	0.11	-	-
土壤类型	0.58	0.28	0.17	-
植被覆盖度	0.55	0.18	0.26	0.10

3 讨 论

根据2013年第一次全国水利普查水土保持情况公报数据显示，新疆水蚀总面积为8.76×10^4 km²，其中轻度侵蚀面积占比最大，中度侵蚀次之，分别为74.06%和21.40%；而强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积均占比较少，分别为2.92%、1.51%、0.11%[11]；在天山北坡中段山区微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积占比分别为36.99%、38.37%、10.40%、5.32%、4.63%、4.30%；相比较而言，天山北坡中段山区侵蚀强度略高于新疆平均水平。众多学者对天山北坡的研究较少且研究主要集中在小流域单一年份土壤侵蚀情况，而区域尺度长时间序列土壤侵蚀模数的合理估算及空间分布特征对于准确预测土壤侵蚀尤为重要。本研究充分考虑到降雨和植被覆盖的季节动态性，均以半月为步长计算降雨侵蚀力因子及生物措施因子。由于生物措施因子的大小对降雨引起土壤侵蚀的作用非常敏感，因此有必要确定植物在不同生长期对降雨侵蚀的影响。Schmidt等人的结论表明，与单一的年度生物措施因子相比，关注四季或一年12个月的生物措施因子的动态方法有助于减少年度土壤侵蚀计算中的误差，采用时空变化的降雨侵蚀力因子和生物措施因子的组合将会更动态更精准的评估土壤侵蚀风险[28]。

利用地理探测器对降雨、地形、土壤、植被土壤侵蚀因子进行定量分析，结果表明降雨是引起土壤侵蚀的主要驱动因素，天山北坡山区受季节性强降水的影响，水蚀较为强烈[5]。本研究表明，坡度对土壤侵蚀模数有正向影响，这与已有研究规律一致[1]。黑钙土及灰褐土的土壤侵蚀模数最低。黑钙土、灰褐土分别是草原植被、森林灌木下的土壤，土壤较为肥沃，植被覆盖较好，林下草灌茂盛。林草的覆盖能够阻挡降雨的冲刷，防止土壤侵蚀的发生，因此林草地土壤不易产生土壤侵蚀，质地较好的土壤具有较强的保水能力，可以促进植被生长，进而降低土壤可蚀性，与本研究结果基本一致[29]。随着植

被覆盖度升高,土壤侵蚀模数降低,主要是因为良好的地表植被能够防止雨滴飞溅侵蚀,减缓地表径流,发达的地下根系能够固持土壤与改善土壤状况,防止径流侵蚀[30]。

4 结 论

本研究基于CSLE模型,应用样地调查、地理信息系统与数理统计,并结合地理探测器方法,定量分析了2000—2018年天山北坡中段山区土壤水力侵蚀时空格局特征,明晰降雨、地形、土壤和植被因素对土壤水力侵蚀的影响。主要得出以下结论:

(1)时间序列上,2000—2018年天山北坡中段山区土壤水力侵蚀强度主要以微度、轻度侵蚀为主,分别占总面积的32.34%~40.87%、33.36%~43.01%;但近20 a来微度、轻度侵蚀面积呈下降趋势($-26.70\ km^2\cdot a^{-1}$、$-77.47\ km^2\cdot a^{-1}$),而其他侵蚀强度面积均呈上升趋势($22.10\sim30.96\ km^2\cdot a^{-1}$),土壤侵蚀日趋严重。空间分布上,2000—2018年研究区多年平均土壤侵蚀模数最大的是乌鲁木齐市,为$(3595.54\pm1383.32)\ t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$;其次为昌吉市和阜康市,分别为$(3321.55\pm1182.19)\ t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$、$(3256.73\pm1170.54)\ t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$;而沙湾县、石河子市最低,分别为$(1752.93\pm767.79)\ t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$、$(1651.66\pm648.60)\ t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$。

(2)不同影响因素对土壤侵蚀的响应各不相同。降雨的大小对土壤侵蚀强度影响不同,当降雨量在250~300 mm、400~450 mm时,土壤侵蚀模数最大;坡度对土壤侵蚀强度影响较为明显,随着坡度的增大,土壤侵蚀模数增大;不同土壤类型对土壤侵蚀的抵抗能力也不同,呈草毡土 > 灰棕漠土 > 棕钙土 > 栗钙土 > 冷钙土 > 黑毡土 > 灰漠土 > 黑钙土 > 灰褐土;较高的植被覆盖度能够对土壤进行保护并防止发生土壤侵蚀。随着植被覆盖度的增加,土壤侵蚀模数降低。

参考文献(References):

[1] 陈童尧, 贾燕锋, 王佳楠, 等. 基于InVEST模型的祁连山国家级自然保护区土壤保持现状与功能[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 150−159. [Chen Tongyao, Jia Yanfeng, Wang Jianan, et al. Current situation and function of soil conservation in Naional Nature Reserves in the Qilian Mountains based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 150−159.]

[2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall-erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation[M]. United States: Agricultural Research Service, 1965: 282.

[3] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[J]. Agricultural Handbook, 1997, 703(404): 537.

[4] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 252. [Liu Baoyuan, Xie Yun, Zhang Keli. Soil Erosion Prediction Model[M]. Beijing: Science Press, 2001: 252.]

[5] 卢刚. 基于CSLE模型的天山北坡西白杨沟流域土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 124−130, 2. [Lu Gang. Quantitative assessment of soil erosion in West Baiyanggou Watershed on North Slopes of Tianshan Mountains based on CSLE model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 124−130, 2.]

[6] 何维灿, 赵尚民, 王睿博, 等. 基于GIS和CSLE的山西省土壤侵蚀风险研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 58−64. [He Weican, Zhao Shangmin, Wang Ruibo, et al. Research on soil erosion risk based on GIS and CSLE in Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 58−64.]

[7] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116−134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116−134.]

[8] Wang H, Gao J B, Hou W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in Karst Areas: Based on the Geodetector method[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(2): 271−286.

[9] 许尔琪, 张红旗, 董光龙. 伊犁河谷土壤水力侵蚀的时空变化研究[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1203−1211. [Xu Erqi, Zhang Hongqi, Dong Guanglong. Temporal and spatial dynamics of soil water erosion in the Yili Valley[J]. Resources Science, 2016, 38(7): 1203−1211.]

[10] 李宏薇, 许尔琪, 张红旗. 伊犁河谷土壤侵蚀综合分区[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 116−124. [Li Hongwei, Xu Erqi, Zhang Hongqi. Soil erosion regionalization in Ili River Valley[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(4): 116−124.]

[11] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持, 2013, 34(10): 2−3, 11. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of first national water census for soil and water conservation[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013, 34(10): 2−3, 11.]

[12] 中华人民共和国国土资源部. 土地利用现状分类标准(GB/T 21010−2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 2−6. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Classification Standard for Current Land Use (GB/T 21010−2017)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 2−6.]

[13] Perkins T, Adler-Golden S, Matthew M, et al. Speed and accuracy improvements in FLAASH atmospheric correction of hyperspectral imagery[J]. Optical Engineering, 2012, 51(11): 111707.

[14] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 8. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion (SL190-2007) [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008: 8.]

[15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711. [Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711.]

[16] Chen F W, Liu C W. Estimation of the spatial rainfall distribution using Inverse Distance Weighting (IDW) in the Middle of Taiwan [J]. Paddy and Water Environment, 2012, 10(3): 209-222.

[17] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26(5): 189-193.

[18] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction[J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17(2): 305-309.

[19] 刘宝元, 毕小刚, 符素华. 北京土壤流失方程[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 60. [Liu Baoyuan, Bi Xiaogang, Fu Suhua. Beijing Soil Loss Equation[M]. Beijing: Science Press, 2010: 60.]

[20] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the Asae, 1987, 30(5): 1387-1396.

[21] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.

[22] Zhu X, Chen J, Gao F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2610-2623.

[23] Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B, et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(1): 1-17.

[24] 崔玉娟. C因子遥感估算方法研究——以北京地区为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2009: 37-41. [Cui Yujuan. Researches on Application of Remote Sensing Method to Estimating Cover-management Factor: Taking Beijing as the Example[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2009: 37-41.]

[25] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24. [Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small Watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.]

[26] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 321. [Tang Keli. Soil and Water Conservation in China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 321.]

[27] 水利部水土保持监测中心. 区域水土流失动态监测技术规定(试行)[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2018: 11-15. [Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources. Technical Regulations for Dynamic Monitoring of Regional Soil Erosion (Trial)[R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2018: 11-15.]

[28] Schmidt S, Alewell C, Meusburger K. Mapping spatio-temporal dynamics of the cover and management factor (C-factor) for grasslands in Switzerland[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 211(4): 89-104.

[29] 胡婵娟, 刘国华, 郭雷, 等. 土壤侵蚀对土壤理化性质及土壤微生物的影响[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 702-708. [Hu Chanjuan, Liu Guohua, Guo Lei, et al. Effects of soil erosion on soil physicochemical properties and soil microorganisms[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4): 702-708.]

[30] 杨波, 王全九, 董莉丽. 榆林市还林还草后土壤保持功能和经济价值评价[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1313-1322. [Yang Bo, Wang Quanjiu, Dong Lili. Assessment of soil conservation function and economic value in Yulin City after implementing the project of "Grain for Green" [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1313-1322.]

Study on temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of hydraulic erosion in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains based on CSLE model

CHANG Mengdi[1,2], WANG Xinjun[1,2], LI Na[1,2], YAN Linan[1,2], MA Ke[1,2], LI Juyan[3]

(1. College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 3. General Station Soil and Water Conservation and Ecological Environment Monitoring of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: It is of great significance to ecological early warning and soil erosion prevention on mastering the spatial law and driving force of soil water erosion differentiation on the northern slope of Tianshan Mountains, which could provide theoretical basis and data support for comprehensive management of regional ecological environment on the northern slope of Tianshan Mountains. Taking the mountainous area in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains as an example, the temporal and spatial pattern characteristics (area, intensity and geographical distribution) of soil hydraulic erosion in the study area from 2000 to 2018 were quantitatively analyzed by means of field investigation, geographic information system, mathematical statistics and geographic detectors, and the internal driving forces of rainfall, topography, soil and vegetation on soil hydraulic erosion intensity were explored by means of geographic detectors based on the Chinese soil loss equation (CSLE). The results showed that: (1) From 2000 to 2018, the intensity of soil hydraulic erosion in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains was mainly slight erosion and mild erosion, accounting for 32.34%−40.87% and 33.36%−43.01% of the total area respectively. In recent 20 years, the area of slight and light erosion had a downward trend (−26.70, −77.47 $km^2 \cdot a^{-1}$), while the area of other erosion intensities had an upward trend (22.10−30.96 $km^2 \cdot a^{-1}$), and the overall soil hydraulic erosion intensity was in an increasing trend. (2) The overall soil erosion modulus was Urumqi > Changji City > Fukang City > Hutubi County > Manas County > Shawan County > Shihezi City. The spatial distribution of erosion intensity in the middle of the northern slope of the Tianshan Mountains was closely related to rainfall, topography, soil, and vegetation. The soil types were brown calcareous soil, grass felt soil, and chestnut soil. The area with vegetation coverage less than 15%, slope greater than 15° and rainfall in the range of 400−450 mm was a high-risk erosion area. (3) The magnitude of the differentiation was measured by the q value in the factor detector. The greater the q value, the stronger the explanatory power of the influencing factor to the spatial distribution of soil erosion, the rainfall (0.49) > soil type (0.17) > slope (0.11) > vegetation coverage (0.10). Different influencing factors obviously enhanced the spatial heterogeneity of soil erosion through interaction, and the coupling effect of vegetation coverage and rainfall factors made the q value increase greatly. It is of great significance to determine the key control areas of soil erosion for comprehensive soil erosion prevention and control.

Keywords: northern slope of Tianshan Mountains; hydraulic erosion; CSLE model; temporal and spatial pattern; geographic detector; influencing factors